

## Étude numérique de la nocivité des défauts dans les soudures

L. Lacourt<sup>1,2,3</sup>, S. Forest<sup>1</sup>, D. Ryckelynck<sup>1</sup>, F. Willot<sup>2</sup>, S. Flouriot<sup>3</sup>, V. de Rancourt<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633 - MINES ParisTech - PSL Research University, laurent.lacourt@mines-paristech.fr

<sup>2</sup> Centre de Morphologie Mathématique, MINES ParisTech - PSL Research University

<sup>3</sup> CEA-DAM, Centre de Valduc

**Résumé** — Les procédés d'assemblages tels que le soudage génèrent des défauts qui peuvent être détectés par des méthodes de contrôle non destructif (CND) durant la production. Ce travail consiste à développer des outils numériques qui permettent d'estimer la qualité d'un joint soudé à partir de données de CND. Les défauts observés sont d'abord caractérisés d'un point de vue morphologique et mécanique. Des méthodes de réduction de modèles acceptant un enrichissement des bases d'ordre réduit ont été développées afin d'introduire à la volée des défauts dans les structures.

**Mots clés** — Réduction de modèles, défauts de soudage, fatigue.

### 1 Introduction

L'assemblage par soudage permet d'assurer un transfert des efforts mécaniques entre deux pièces. Le procédé a un grand impact sur les propriétés locales des matériaux : les microstructures sont modifiées par le cycle thermique et des contraintes résiduelles peuvent apparaître. La soudure apparaît donc comme une singularité et joue généralement un rôle prépondérant dans les mécanismes de ruine de la structure. Le procédé de soudage par laser impulsif peut générer des défauts dans la zone fondue (ZF) comme présenté sur la métallographie de la Figure 1. Ce travail est focalisé sur l'effet de ces défauts sur la tenue mécanique de l'assemblage.

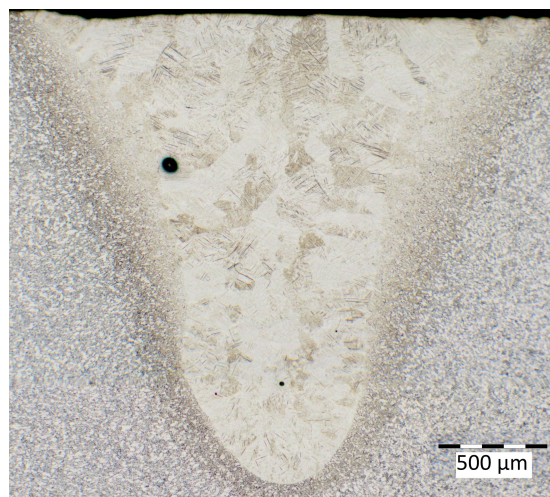


FIGURE 1 – Métallographie d'un joint soudé obtenu par laser impulsif. Un pore est nettement visible dans la partie gauche de la zone fondue.

Les techniques de contrôle non destructif (CND) aujourd'hui utilisées dans l'industrie permettent d'observer, de localiser et de dimensionner de tels défauts [2]. Le travail présenté ici vise à développer des outils numériques permettant de prendre en compte ces défauts dans des calculs de structures. Dans un premier temps, des joints soudés sont expertisés par tomographie aux rayons X afin d'étudier la morphologie des défauts produits ainsi que leur répartition spatiale. L'analyse de ces données permet de mettre en place et de calibrer un modèle de génération de populations de défauts réalistes. Il est ainsi possible en considérant plusieurs réalisations de populations de défauts de mettre en évidence dès le

dimensionnement de la pièce les configurations critiques qui mèneront au rebut. D'autre part, ce travail a aussi pour objectif de fournir des outils d'aide à la décision une fois le contrôle effectué. Une stratégie de calcul a été développée qui permet l'enrichissement d'un modèle d'ordre réduit avec des données issues de CND. L'objectif est de fournir des résultats sur des structures complexes contenant des défauts dans un temps compatible avec une cadence de production (de l'ordre de quelques dizaines de minutes).

## 2 Analyse et génération de populations de défauts

### 2.1 Acquisition d'images

Une soudure autogène TA6V/TA6V a été passée en tomographie sur la ligne PSICHÉ du synchrotron SOLEIL. Afin de valider les mécanismes de génération de défauts supposés et de pouvoir calibrer plus facilement un modèle de génération de défauts, les paramètres de soudage ont été réglés de manière à créer un grand nombre de défauts. Une reconstruction tridimensionnelle des images est présentée sur la Figure 2.

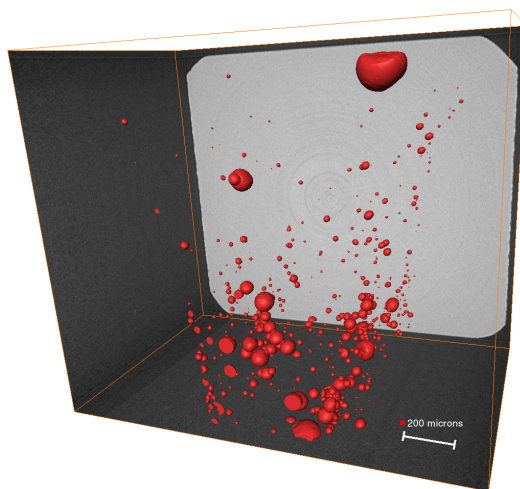


FIGURE 2 – Reconstruction 3D des images de tomographies obtenues au Synchrotron SOLEIL. Tous les volumes rouges représentent des défauts. Le voxel est un cube de  $1,3\mu\text{m}$  de côté.

L'acquisition de ces données a permis de développer une routine d'analyse d'images en MATLAB qui permet de binariser l'image, d'extraire chacun des défauts, et d'en réaliser une triangulation de surface.

### 2.2 Caractérisation des défauts

Un jeu d'indicateurs morphologiques est mis en place pour caractériser chacun des défauts. Ils permettent de quantifier la forme globale du défaut ainsi que sa convexité, les variations de sa courbure et sa sphéricité. Il ressort de cette étude que la majorité des défauts présente une forme quasi-sphérique.

Ces seuls indicateurs morphologiques ne permettent pas d'estimer la nocivité d'un défaut. C'est la raison pour laquelle des calculs mécaniques ont été menés de manière systématique sur ces défauts isolés dans une matrice infinie. Le chargement le plus simple étudié est celui de traction simple dont la direction est notée  $\underline{d}$  dans la suite. Le tenseur des contraintes appliqué à l'infini est alors  $\underline{\underline{\sigma}}^\infty = \sigma^\infty \underline{d} \otimes \underline{d}$ . En parcourant l'ensemble des directions de l'espace, une carte de concentration de contraintes peut être tracée comme présenté sur la Figure 3. Ces cartes décrivent l'anisotropie de la réponse mécanique autour du défaut. En couplant les descripteurs morphologiques et des indicateurs issus de l'analyse mécanique, il devient alors possible de cibler les défauts les plus nocifs pour un chargement donné.

### 2.3 Analyse de la répartition spatiale des défauts

Les données acquises en tomographie aux rayons X ont permis de valider les mécanismes de formation des défauts et de développer un modèle de génération de populations de défauts. Ce modèle repose

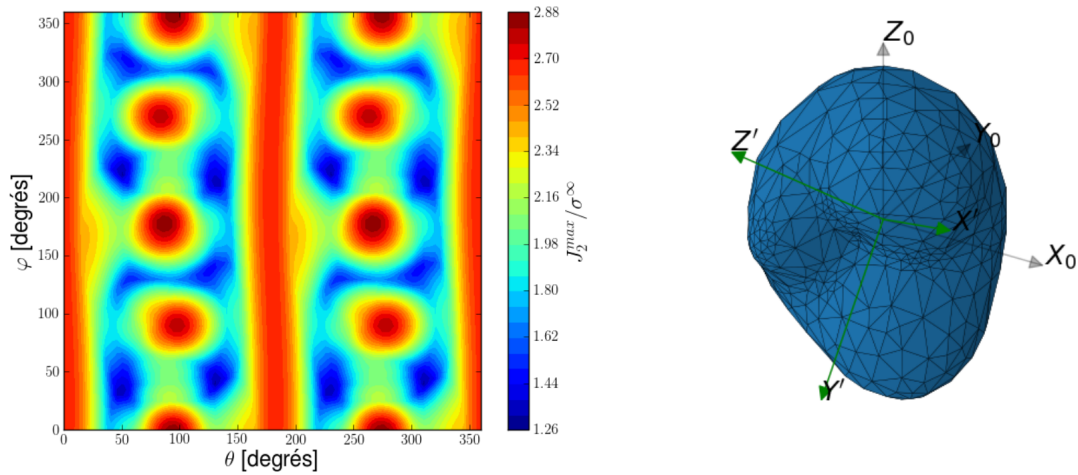


FIGURE 3 – Carte de concentration de contrainte équivalente de von Mises du défaut représenté à droite sollicité en traction simple dans la direction  $\underline{d} = (\cos(\varphi) \sin(\theta), \sin(\varphi) \sin(\theta), \cos(\theta))^T$ .

sur plusieurs hypothèses : les défauts générés sont tous sphériques ; il n’y a pas de corrélation entre la position et la taille du défaut et un joint soudé est constitué de l’assemblage d’impulsions tirées indépendamment. La Figure 4 compare un joint soudé observé en tomographie et un joint simulé. Les différentes couleurs correspondent aux différentes impulsions qui constituent la soudure.



FIGURE 4 – Population de défauts observée (à gauche, les défauts sont représentés par leur sphère équivalente) et simulée (à droite).

Un outil logiciel a été développé permettant d’identifier les paramètres du modèle de génération puis de simuler des populations de défauts et de les intégrer dans une structure soudée avant de la mailler. Le nombre de défauts considérés ainsi que leur petite taille face à celle de la structure, mènent à des difficultés de maillage et à des problèmes à très grand nombre de degrés de liberté. Pour répondre à cette problématique une stratégie basée sur les méthodes de réduction de modèles a été mise en place.

### 3 Hyper-réduction de modèles et structures contenant des défauts

#### 3.1 Démarche générale de réduction de modèles

La méthode de réduction de modèles utilisée est l’hyper-réduction développée dans [3, 4, 5]. Elle fait partie de la famille des méthodes basée sur une approximation de rang faible de tenseur. Les champs de déplacement solutions sont recherchés dans un espace de dimension réduite. De plus, la résolution est menée sur un maillage réduit, ce qui permet d’améliorer encore l’accélération en temps de calcul. Ce

maillage réduit peut être composé de parties non connexes. Cela fait de l'hyper-réduction une méthode pouvant gérer des maillages non conformes ce qui s'avérera un atout intéressant ici.

La plupart des méthodes de réduction de modèles sont généralement appliquées en deux phases : une phase dite "hors-ligne" durant laquelle le modèle d'ordre réduit est construit et une phase "en ligne" d'utilisation à proprement parler du modèle d'ordre réduit. La phase hors-ligne est très demandeuse en puissance de calcul : l'espace des paramètres de simulation est balayé et les éléments de la base d'ordre réduit sont construits en traitant les résultats de simulation. L'hypothèse sous-jacente est que le problème que l'on souhaite traiter peut être paramétré. Or ce n'est pas le cas de défauts observés par tomographie qui peuvent présenter des formes variées. La stratégie présentée ici permet de contourner ce problème en construisant à la volée des modes qui vont venir enrichir une base d'ordre réduit pré-existante.

### 3.2 Décomposition de la réponse mécanique autour d'un défaut

L'enrichissement proposé permet de corriger localement autour des défauts la réponse mécanique. Il repose sur la séparation du champ de déplacement en deux contributions : celle du massif sans défaut et celle de la fluctuation induite par le défaut. La Figure 5 présente cette décomposition sur un cas en deux dimensions. Sur cet exemple, il est important de noter que le champ de fluctuations (à droite) présente des valeurs inférieures en ordre de grandeur aux déplacements mis en jeu. De plus, le champ de fluctuations s'annule au loin du défaut.

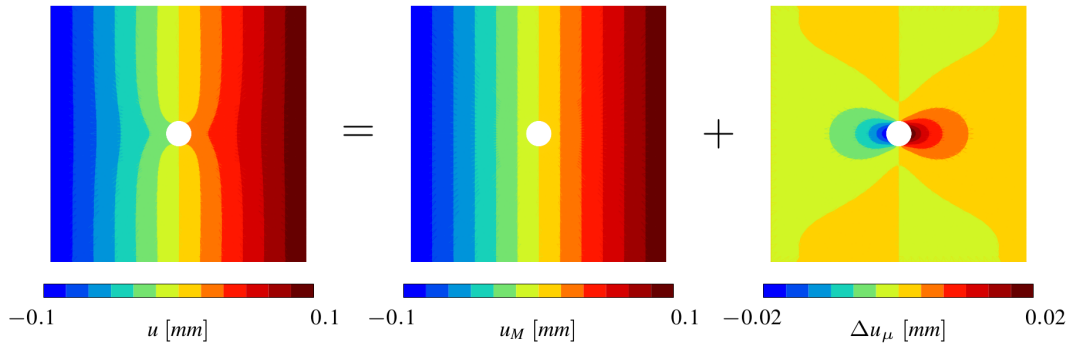


FIGURE 5 – Décomposition de la réponse mécanique autour d'un défaut sphérique sollicité en traction dans la direction horizontale.

De la même manière, la réponse mécanique d'une structure contenant des défauts peut s'écrire et s'approximer comme suit :

$$\begin{aligned} \underline{u}(\underline{x}, t) &= \underline{u}_M(\underline{x}, t) + \Delta \underline{u}_\mu(\underline{x}, t) \\ &\approx \sum_{i=1}^{N_M} \underline{V}_i^M \gamma_i^M + \sum_{i=1}^{N_\mu} \underline{V}_i^\mu \gamma_i^\mu \end{aligned}$$

$(\underline{V}_i^M)_{i=1, \dots, N_M}$  est une famille de modes empiriques macroscopiques qui décrit la réponse de la structure sans défauts. Elle est enrichie de la base  $(\underline{V}_i^\mu)_{i=1, \dots, N_\mu}$  construite sur les fluctuations des défauts présents. Cet enrichissement permet une meilleure prédiction de la réponse mécanique autour des défauts. De plus, la base macroscopique peut être construite *a priori* sans connaissance de la population de défauts, par exemple en post-traitant les calculs de dimensionnement de la pièce.

### 3.3 Cas d'application

Cette section présente un cas d'application de la stratégie de calcul. Le problème considéré est celui d'un joint soudé à la géométrie idéalisée (voir Figure 6). Des calculs cycliques sur la structure sans défaut ont permis de construire des modes empiriques macroscopiques représentés sur la Figure 6. Ensuite, afin d'insérer un défaut dans le joint soudé, des modes de fluctuations ont été calculés. Pour ce faire, le défaut est soumis à un chargement proche de celui qu'il subira dans la structure. La base d'ordre réduit de fluctuations obtenue est donc particulièrement adaptée au problème.

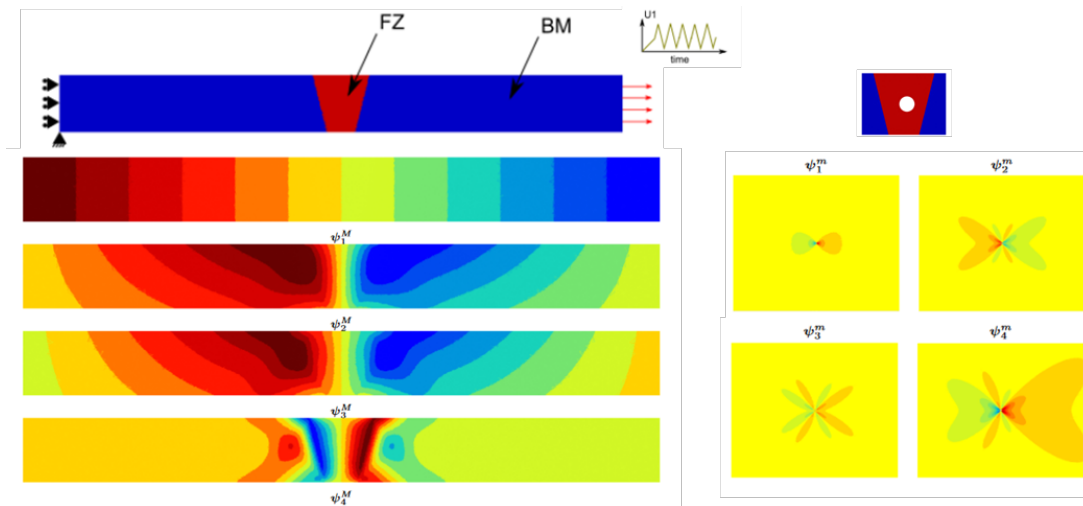


FIGURE 6 – Application de la stratégie de calcul dans le cas d’un joint soudé avec une géométrie de ZF idéalisée (en haut). Les modes macroscopiques sont au nombre de 4 et représentent le comportement de la structure sans défauts. Sur la droite, les modes de fluctuations calculés en introduisant le défaut dans une matrice de grande taille.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants. En effet, les courbes contraintes-déformations aux points les plus chargés sont bien prédites. Les facteurs d’accélération en temps de calcul sont de l’ordre de la centaine.

## 4 Conclusions et perspectives

La première partie des outils présentés permet d’étudier l’impact de la présence de défauts dans un joint soudé. La constitution d’une bibliothèque de défauts est à l’étude. Couplée à des outils d’études automatiques (comme des outils de métamodélisation à apprentissage dirigé [1]), cette base de données pourra référencer des cas critiques ou non nocifs. Un calcul direct ne sera alors nécessaire que dans le cas d’une configuration extrêmement atypique.

Une stratégie a été développée pour résoudre ces calculs directs lorsque nécessaire. Basée sur la méthode d’hyper-réduction, elle réduit grandement la taille du calcul le plus lourd à mener. Cela la rend pertinente dans un cadre de production dans lequel des super calculateurs ne sont pas toujours accessibles. De plus, les performances obtenues sur des structures académiques sont satisfaisantes.

## Références

- [1] C. Cannamela, L. Le Gratiot, J. Garnier *Construction d’un méta-modèle pour des codes à plusieurs niveaux de fidélité*, Chocs 48, pp. 5-15, 2017.
- [2] J.D. Madison, L.K. Aagesen *Quantitative characterization of porosity in laser welds of stainless steel*. Scripta Materialia, pp. 783-786, 2012.
- [3] D. Ryckelynck *A priori hyperreduction method : an adaptive approach* International Journal of Computational Physics, 202 :346-366, 2005.
- [4] D. Ryckelynck *Hyper reduction of mechanical models involving internal variables* International Journal of Numerical Methods in Engineering, 77(1) :75-89, 2009.
- [5] D. Ryckelynck, K. Lampoh, S. Quilici. *Hyper-reduced predictions for lifetime assessment of elasto-plastic structures* Meccanica, 51, 2016.